

Propuesta de un trabajo práctico de laboratorio sobre corrimiento Doppler óptico en el aula universitaria

Esteban Guillermo Szigety^{1,a}, Luis Bernal^{2,b}, Luis Bilbao^{3,c}

¹Departamento de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata. Mar del Plata. Argentina.

²Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata. Mar del Plata. Argentina.

³Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad de Buenos Aires. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Argentina.

^aesteszige@gmail.com, ^bbernal314@gmail.com, ^cbilbao@tinfiplfp.uba.ar

[Recibido en junio de 2016, aceptado en noviembre de 2016]

Los trabajos prácticos de laboratorio sobre efecto Doppler óptico no son una tarea sencilla, tanto en el diseño como en su realización para fines didácticos. La principal dificultad es el movimiento de la fuente, ya que pequeñas perturbaciones del orden de la longitud de onda de la luz introducen ruidos en la medición. El uso de un espejo giratorio, en el que un haz se refleja desde el lado de avance y otro es reflejado desde la parte en retroceso, minimiza problemas de ruido. El trabajo práctico que se describe en este artículo se puede realizar con material de bajo costo y accesible a un laboratorio con fines didácticos. Se incluyen preguntas y problemas que permiten al docente abordar esta práctica tanto desde lo teórico como lo metodológico.

Palabras clave: Física ondulatoria y moderna; Óptica; Efecto Doppler; Enseñanza de la ciencias; Didáctica de la investigación.

Proposal of a practical laboratory work on Optical Doppler Shift in the university classroom

Practical teaching experiments on optical Doppler effect are not a simple task, not only by the design but also because the experiment itself have many issues. The main problem is to produce a smooth movement of the light source, for little imperfections, of the order of the wavelength, result in important noises in the final measurements. Using a rotating mirror in which the incident beam is reflected in both the receding and the advancing parts of its surface, allows to minimize noise problems as well as mechanical deviations. The laboratory practice described in this paper can be constructed using low cost parts that are usually found in student laboratories. We also propose some questions and problems to help the teaching to work out this matter.

Keywords: Wave and modern physics; Optics; Doppler effect; Teaching resources; Research on didactic.

Para citar este artículo: Szigety E. G., Bernal L., Bilbao L. (2017) Propuesta de un trabajo práctico de laboratorio sobre corrimiento Doppler óptico en el aula universitaria. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 14 (1) 135-143. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10498/18852>

Introducción

Los experimentos sobre la propagación de ondas mecánicas y electromagnéticas son generalmente llevados a cabo en los cursos introductorios de física elemental. Muchos kits de enseñanza disponibles en el mercado cubren la mayor parte de los experimentos. Sin embargo el corrimiento por efecto Doppler óptico no se encuentra fácilmente. Aunque este efecto es bien conocido y se introduce en Física Óptica y Relativista, llevar adelante un trabajo práctico sobre este tema no es sencillo. Como consecuencia de esto las experiencias que se encontraron suelen estar dirigidas a tratar el corrimiento por efecto Doppler a través de ondas de sonido o microondas (Saba y Rosa 2003, Hernández *et al.* 1991). Cuando se trata de observar esta experiencia por medio de ondas de luz, se suele usar un espejo en movimiento rectilíneo (Romero *et al.* 2012, Bensky y Frey 2001, Belich *et al.* 1997), pero no es fácil lograr que este

tenga una trayectoria lineal y sin irregularidades. Cualquier imperfección del orden de una longitud de onda introduce ruidos importantes sobre la señal.

Esta propuesta plantea un Trabajo Práctico de Laboratorio (TPL) para indagar el corrimiento Doppler en ondas lumínicas. El TPL se basa en la generación de batidos del orden de 100 MHz, para ello la velocidad de la fuente debe rondar los 10 m/s. Existen actuadores de movimiento lineal de velocidad inferiores a 10 m/s y de una alta precisión, pero es prácticamente imposible adquirirlos para un laboratorio educativo de la Universidad pública a causa de su precio. En este trabajo se utilizará un espejo giratorio para producir el corrimiento por efecto Doppler que permite, como se verá más adelante, resolver el problema de los costos y de las imperfecciones.

El efecto Doppler óptico es un fenómeno físico muy utilizado por distintas áreas de la ciencia como la Cosmología (Feinstein 1998 y Longari 1998) y Física de Plasma (Dewandre *et al.* 1981). Es por eso fundamental este tipo de prácticas experimentales sobre Física Moderna con fines didácticos para los estudiantes de ciencias. Se propone en este artículo dar una idea de los contenidos teóricos, instrumentales y metodológicos necesarios para aplicar esta práctica en el aula universitaria. Los autores son docentes e investigadores que llevan adelante este TPL con estudiantes de la carrera de Licenciatura en Física en la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP).

Fundamentos teóricos de la experiencia

La frecuencia de la luz visible se encuentra en el orden de los 500 THz, valor que está mucho más allá de la resolución de cualquier sensor óptico. Sin embargo la frecuencia de batido de dos ondas que interfieren es muy inferior y puede ser detectada por un fotodiodo de económica adquisición en cualquier comercio especializado en electrónica. En este TPL las ondas son dos haces de luz divididos de un mismo frente de onda y se hacen incidir sobre los extremos de un espejo en rotación. Para un observador fijo en el laboratorio, uno de los haces impacta sobre una superficie que se acerca y el otro lo hace sobre una superficie que se aleja. Ambos reflejos se encuentran corridos en frecuencias por efecto Doppler pero con signos opuestos. Al hacerlos interferir, su diferencia de frecuencias producirá un batido que se puede medir con un osciloscopio estándar.

El corrimiento por efecto Doppler óptico de una fuente que se mueve con velocidad v_f respecto de un observador es:

$$f' = f \sqrt{\frac{1 \mp v_f/c}{1 \pm v_f/c}}. \quad (1)$$

Esta expresión se conoce como efecto Doppler relativista (Serway y Jewett 2001, Jackson 1999), donde c es la velocidad de la luz en el vacío. Esta experiencia está diseñada para detectar los efectos del desplazamiento Doppler óptico con velocidades muy inferiores a la velocidad de la luz $v_f \ll c$, cuyo ajuste a primer orden en un desarrollo de Taylor, nos queda:

$$f' \approx f(1 \mp v_f/c). \quad (2)$$

Donde f es la frecuencia propia de la fuente y f' es la frecuencia que mide un observador en el laboratorio cuando la fuente está en movimiento. El signo será positivo si la fuente avanza hacia el observador y negativo cuando se aleja. Existen otras expresiones para el efecto Doppler óptico (Gjurchinovski 2013) cuya diferencia con la expresión (2) es de segundo orden, imposible detectar con las velocidades utilizadas en este trabajo práctico.

Para el análisis de este experimento supongamos primero un espejo que se mueve linealmente hacia un observador con velocidad \vec{V}_n y un haz rebota contra el espejo con un ángulo α ,

como muestra la figura 1. El observador recibe la luz del reflejo, es decir, de una imagen virtual de la fuente.

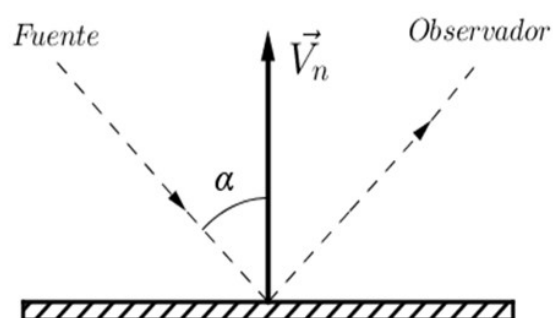


Figura 1. Espejo plano con velocidad dirigida hacia el observador.

En el caso de un espejo plano, esa imagen virtual de la fuente, se mueve respecto del observador con una velocidad v_f que es el doble de la velocidad del espejo y descompuesta en la dirección del observador queda:

$$v_f = 2 V_n \cos \alpha. \quad (3)$$

En nuestro caso, para lograr producir un batido con la luz que refleja el espejo en rotación, se debe tomar un haz de luz y dividirlo en dos haces paralelos con una lámina semitransparente. Ambos haces se reflejan en los extremos A y B del espejo en rotación, como se observa en la figura 2-a y 2-b. Luego de rebotar contra el espejo en movimiento los haces se encuentran corridos en sus frecuencias ya que en un caso el espejo se aleja (A) y en el otro se acerca (B). Cabe preguntarse qué ocurre si el espejo tiene una componente de velocidad paralela a la superficie. Dicha componente tiene la misma dirección para ambos puntos A y B, produciendo esto que no se observe efecto alguno sobre el pulso de batido cuando se restan las frecuencias.

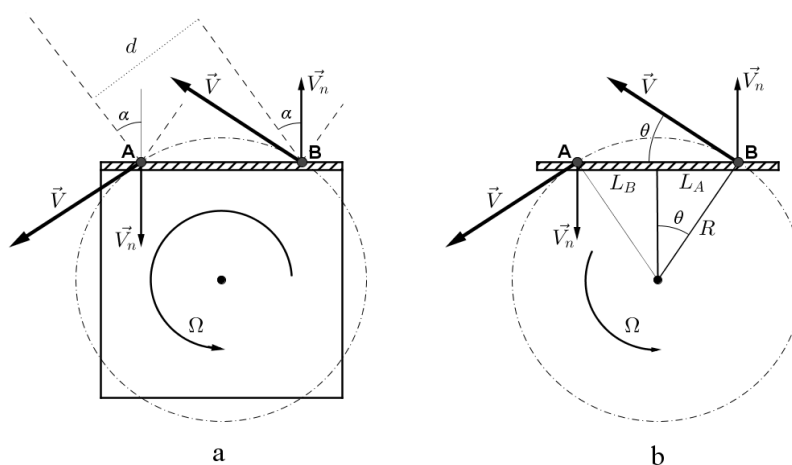


Figura 2. Espejo plano en rotación con sus correspondientes vectores de velocidad.

La velocidad V (módulo del vector \vec{V}) es tangente a la trayectoria circular que describen los puntos A y B al rotar el espejo con una velocidad angular Ω y radio R , por lo que:

$$V = \Omega R. \quad (4)$$

Descomponiendo este vector de velocidad en la dirección normal, se obtendrá la dirección de acercamiento y alejamiento V_n de los puntos A y B para un observador fijo:

$$V_n = V \sin \theta = V L_A / R. \quad (5)$$

Finalmente relacionando las expresiones (2), (3), (4) y (5) quedan las dos frecuencias observadas de los haces al emergen del espejo:

$$\text{Espejo en retroceso } f'_A = f(1 - 2L_A \Omega \cos \alpha / c). \quad (6)$$

Espejo que avanza $f'_B = f(1 + 2L_B \Omega \cos \alpha / c)$. (7)

Al hacer interferir los haces se produce un batido cuyo pulso envolvente se puede obtener:

$$f'_B - f'_A = 2f(L_A + L_B) \Omega \cos \alpha / c. \quad (8)$$

La distancia $L_A + L_B$ sobre el espejo, junto con el segmento d de separación de los haces paralelos forman un triángulo rectángulo tal que $d = (L_A + L_B) \cos \alpha$ y de la relación de ondas $c = f \lambda$, queda finalmente:

$$f'_B - f'_A = 2d \Omega / \lambda. \quad (9)$$

Es interesante destacar que la frecuencia de batido no es afectada individualmente por las distancias L_A y L_B (sólo por la suma), las cuales siquiera deben ser simétricas al eje de rotación. El único parámetro geométrico a tener en cuenta es la distancia d , la cual puede ser afectado por variaciones en el ángulo α de incidencia debido a las vibraciones o imperfecciones de alineación; este error se puede minimizar utilizando ángulos cercanos a $\alpha = 45^\circ$.

Descripción del experimento

Los costos económicos de esta práctica experimental son bajos, lo que la hace completamente realizable. Se pueden remplazar algunos de los elementos que se proponen a continuación. La fuente de luz utilizada proviene de un láser verde He-Ne de baja potencia (clase 1). Se ha probado también un puntero láser rojo comercial muy económico que ha dado excelente resultados. La utilización de láseres clase 1 es común en las prácticas de laboratorio ya que son de riesgo muy bajo. En general, los reflejos del haz que incidan sobre la retina de los estudiantes u observadores del trabajo práctico no producen daño alguno. Sin embargo, al comienzo del semestre se explica a los estudiantes las normas de seguridad en el uso de estos láseres. Como protección adicional, se ubican barreras alrededor del aparato para evitar que la luz del láser y sus reflejos incidan sobre quienes realizan el TPL.

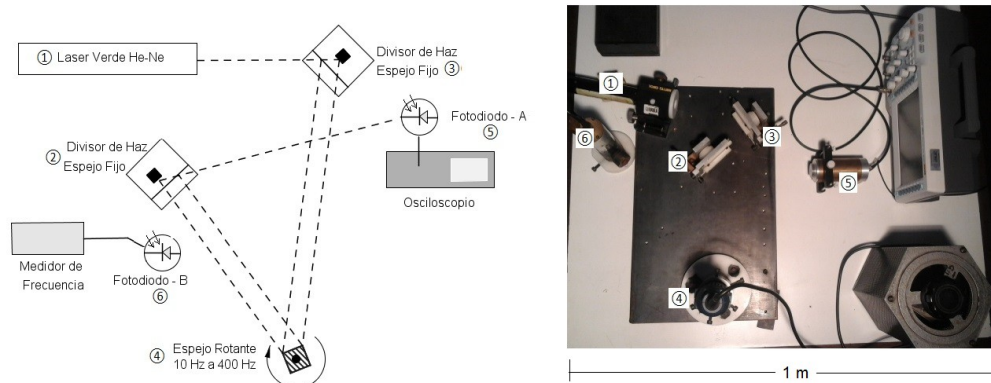


Figura 3. Disposición de los elementos para el experimento.

Se utilizaron divisores de haz y espejos que se encuentran en cualquier kit óptico estándar. Algunos soportes especiales se construyeron con el fin de ubicar en forma firme y segura estos elementos sobre una placa de hierro. La separación d de los haces de luz fue de 17 mm, pero se puede utilizar una distancia menor. Los haces que se recombinan se midieron con un fotodiodo (llamado fotodiodo-A en la figura 3) que se consigue a bajo costo. Este dispositivo se puede remplazar por un fotomultiplicador, pero se debe tener cuidado de que el láser no proyecte su luz durante mucho tiempo sobre este sensor. Para medir la frecuencia de rotación del espejo se utilizó el fotodiodo-B. La señal eléctrica se registró con un osciloscopio de 100

MHz, Tektronik TDS 320 capaz de proveer una Transformada de Fourier Rápida (FFT). Esta función resulta de gran utilidad ya que permite analizar la componente armónica del batido a partir de la señal que proviene del fotodiodo, sin tener que exportar los datos del osciloscopio y realizar un procesamiento externo. El espejo giratorio fue hecho con un cubo de 20 mm de lado de cobalto-acero y sólo una de las cuatro caras se pulió a mano hasta dejarla reflectante a la luz. También se puede usar un espejo plano de óptica convencional. Para producir la rotación del espejo se usó una herramienta rotativa de hasta 30.000 rpm de las que se consiguen en cualquier ferretería. Su velocidad fue controlada con un autotransformador de 0 a 220 volts. La experiencia puede realizarse a menores velocidades dando igualmente resultados satisfactorios.

En nuestro experimento el láser de He-Ne verde tiene una longitud de onda de $\lambda = 543,5 \text{ nm}$

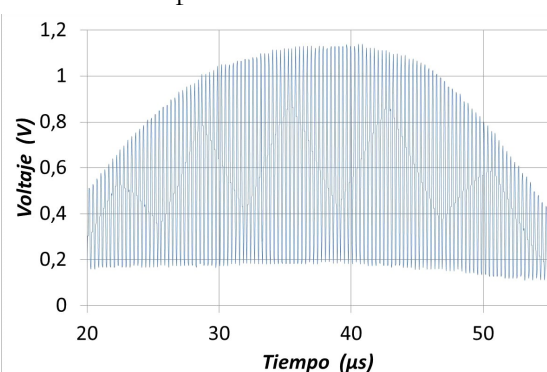


Figura 4. Pulso recibido por el fotodiodo; se representan volts en función del tiempo.

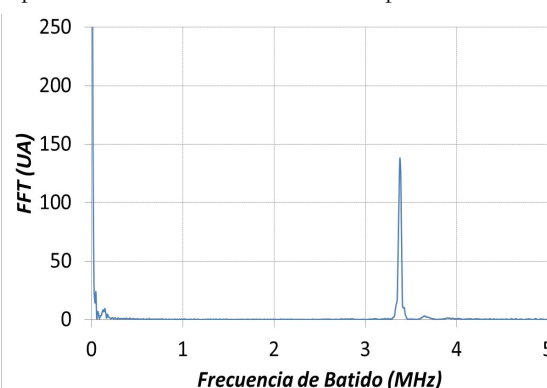


Figura 5. Transformada de Fourier del pulso recibido por el fotodiodo.

y la distancia de separación de los haces es $d = 17 \text{ mm}$. La frecuencia del espejo se varió de 5 a 100 Hz. En la figura 4 se ve la variación temporal de un batido obtenida para una frecuencia de rotación de 5,57 Hz. Se aplicó una transformada de Fourier (FFT) al conjunto de datos (figura 5) y se registró la frecuencia del pico, 3,43 MHz, estando este dato en buen acuerdo con el valor esperado de la relación (9). En la figura 6 se observa la relación entre la velocidad angular y frecuencia de batido.

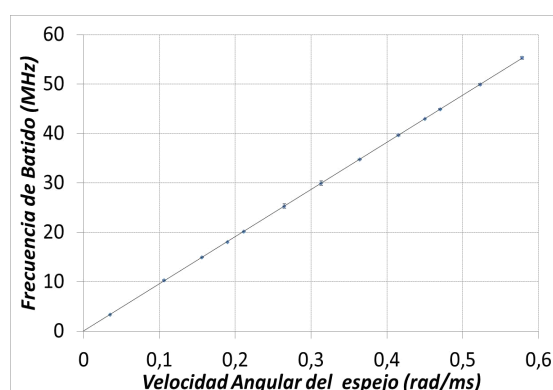


Figura 6. Relación entre la frecuencia del batido y la velocidad angular de rotación. El error de la medición es apenas visible en esta escala.

Análisis teórico y metodológico del Trabajo Práctico de Laboratorio

Los autores consideran que existen razones bien fundadas para considerar a la práctica experimental insustituible en la formación de los futuros profesionales. Un primer punto es de carácter motivacional para los estudiantes. La elección de nuestros jóvenes al decidirse por una carrera científica o técnica está motivada por variados factores entre los que se pueden contar el interés en temas científicos, la inspiración de algún profesor, la divulgación a través de revistas o documentales, entre otros. También la realización de actividades experimentales o de laboratorio en la escuela secundaria es un factor muy importante en la generación de vocaciones científicas (Vázquez Alonso y Manassero 2015). Sin embargo las clases de laboratorio parecen ser dejadas de lado al ingresar en la universidad. La cantidad de horas

destinada a los experimentos y laboratorio de física resulta superada por las horas de clase convencionales donde se explica los contenidos teóricos. A través de actividades experimentales como las presentadas en este artículo los estudiantes fortalecen las convicciones que los han motivado a elegir el camino de la ciencia.

Por otro lado numerosos investigadores en enseñanza de la ciencia (Acevedo *et al.* 2007, Hodson 1994, Gil Pérez 1986, Gil Pérez y Valdés Castro 1996, 2005, Petrucci *et al.* 2011, Saraiva-Neves *et al.* 2006) confirman la importancia de replantear la práctica experimental tanto dentro del aula secundaria como universitaria. Desde un punto de vista epistemológico diremos que es necesario un análisis más cuidadoso de la relación entre la observación, el experimento y la teoría. Evitando así caer en el simplismo de ver a la práctica de laboratorio desde el dominio del «inductivismo ingenuo» (Chalmers 2000). No se puede pensar que su finalidad sea ilustrar un conocimiento ya procesado y terminado. La posibilidad de observar un fenómeno no solo le permite al alumno conceptualizar la teoría a través de una experiencia, sino también poder comprender el papel que juega esta instancia dentro del quehacer científico.

No se puede hablar de objetivos definidos (Séré 2003) cuando de un TPL se trate, es más apropiado hablar de abordaje didáctico. Una práctica puede ser concebida para abordar distintos aspectos que el docente quiere fortalecer. Puede consistir en verificar una ley, discutir y manipular las incertezas de las mediciones, enfrentar la teoría con una experiencia o estudiar una técnica o procedimiento de medición. Los autores han elaborado una serie de preguntas de gran utilidad para el docente que quiera realizar un abordaje didáctico desde la metodología, desde la teoría o desde ambos.

I) Cuestiones para abordar los contenidos teóricos:

- La relación (1) corresponde al efecto Doppler relativista y la expresión (2) es una aproximación debido a que $v_f \ll c$. ¿A qué resultados se hubiera arribado si no se considera esta aproximación? Obtenga la frecuencia detectada y retransmitida por el espejo y la que detecta un observador que recibe el rebote utilizando únicamente la expresión (1).
- ¿Cómo habría que modificar la experiencia si se quiere utilizar ondas sonoras? Fundamente en base a la pregunta anterior y describa los cambios que ocurrirían en la experiencia.
- ¿Qué mediciones y tipo de gráfico permitiría confirmar que la relación obtenida en (9) se cumple?
- ¿Se podrá aprovechar esta práctica para medir la velocidad de la Tierra respecto de su eje? Discuta las posibilidades y dificultades de realizar esta experiencia y sus consecuencias en la corroboración del efecto Doppler relativista.

II) Cuestiones para abordar los contenidos metodológicos:

- La alineación de este arreglo tiene la misma dificultad de alineación de un interferómetro de Mach-Zehnder. Analice este interferómetro y compárelo con el arreglo que hay armado para esta ocasión. Analice los puntos débiles de alineación de este arreglo.
- ¿En qué afecta que los haces de láser no se reflejen simétricos respecto del eje de rotación?
- Desplazando el fotodiodo a 6 m de distancia del espejo, suponiendo un diámetro del haz de 1 mrad y midiendo en los rangos de frecuencia entre 5 a 100 Hz, es posible calcular el tiempo en el que el pulso luminoso pasa por la abertura del fotodiodo. Estime el valor de este tiempo y compárelo con el de la frecuencia de batido que se prevé observar.

- A una velocidad de rotación dada, la señal reflejada del espejo es como un «faro parpadeante». Se puede aumentar o disminuir la distancia del fotodiodo detector de la rotación del espejo. ¿En qué afecta esta distancia a la realización del experimento?

- Cualquier arreglo destinado a estudiar el efecto Doppler óptico presenta dificultad cuando las vibraciones son del orden de la longitud de onda de la luz, se introducen errores en las señales que impide observar cómodamente los picos del batido. Este arreglo experimental tiene vibraciones de la máquina herramienta que son superiores a la longitud de onda que se está tratando de medir. Explicar la razón por la cual los resultados tienen un bajo margen de error y se puede confirmar la relación (9).

Dado lo novedoso de la práctica, estamos ante la posibilidad de observar a los estudiantes analizar y llevar adelante conclusiones sin las expectativas de conocer los resultados previamente. Prueba de esto resulta ser parte del material escrito que los alumnos elaboraron en sus reportes de laboratorio. El recorrido didáctico que se propone en este trabajo consiste en discutir de antemano las preguntas antes planteadas y realizar luego las mediciones pertinentes. De esta metodología didáctica encontramos fundadas pruebas en el material escrito por ellos sobre la vinculación entre la teoría y la práctica así como una comprensión más profunda sobre el efecto Doppler óptico. Los autores consideran que una práctica experimental carente del contenido teórico fundamenta un manejo del equipamiento carente de significado. Es por eso que el trabajo experimental aquí planteado es el disparador para vincular estos dos aspectos de la física en forma significativa.

En la tabla 1 se presentan extractos de las respuestas dadas por los alumnos y su correspondiente análisis. Estas son algunas de las afirmaciones y comentario que los alumnos de las cursadas 2013, 2014 y 2015 escribieron en sus informes sobre este práctico. No son la prueba definitivas de la utilidad de este práctico en la conceptualización de este tema pero nos ha servido a los autores para apoyar la enorme capacidad que tiene este diseño para acercar a los estudiantes una nueva forma de comprensión y entendimiento del efecto Doppler óptico.

Tabla 1. Extractos de los informes de los alumnos (izquierda) y análisis de los autores (derecha).

«... el pulso observado en el osciloscopio (Gráfica 4 en este artículo) tiene una forma acampanada, similar a una gaussiana. Para interpretar estas variaciones en la intensidad del batido se deben tener en cuenta la distribución de intensidad de la luz del haz láser. Negamos de plano que esta variación sea producto del ancho de la abertura del sensor, ya que si no debería ser un pulso cuadrado» (Grupo 1 - 2015)	Aunque los alumnos no profundizan en la distribución de intensidad de la luz láser, reconocen que la forma del pulso se ajusta a la observada. La experiencia en este punto permite discutir aspectos relacionados con la decisión metodológica de que la abertura del sensor sea mucho más pequeña que el ancho del haz.
«los haces no son líneas matemáticas sino que tienen un espesor no nulo sin embargo esto no resulta en una alteración de la frecuencia de batido... Es cierto que cada parte del haz incide sobre un punto del espejo con diferente velocidad y por tanto será reflejada con diferentes frecuencia pero el batido depende solo de la velocidad angular y de la distancia d que se mantiene constante para cada haz del espesor del láser» (Grupo 2 - 2013)	Aquí el grupo de alumnos se plantea un problema experimental concreto, el ancho de los haces de láser. No solo han logrado identificar una fuente de error sino que además concluyen acertadamente que la teoría predice la independencia de esta variable.
«en este trabajo las transformadas de Galileo se aproximan a primer orden a las ecuaciones de Lorentz. Se necesita demasiada precisión para distinguir entre uno y otro resultado» (Grupo 1 - 2013)	Esta afirmación equivocada es un ejemplo de la utilidad de este tipo de experiencias en la enseñanza de los conceptos básicos de la Relatividad. Sirve para explicar que a bajas velocidades la transformación de Lorentz nunca se aproxima a la de Galileo. El término de primer orden $\gamma \approx 1 + v^2/c^2$ en la transformación del tiempo existe inclusive a bajas velocidades como se muestra en Baierlein (2006).

Tabla 1. Continuación.

«... la distancia entre el beam-splitter (divisor de haces) y el espejo es fija se puede deducir una dependencia entre la distancia d y el ángulo de rotación del espejo... Dado que el detector que se utiliza para registrar la intensidad de los haces superpuestos tiene una cierta apertura, es decir detecta la recombinación para un cierto intervalo de ángulo, esto se traduce en una variación temporal de la frecuencia de batido observada como se ve en la expresión ((9) para este artículo)» (Grupo 1 - 2014)	Este grupo de alumnos logró encontrar un error que se introduce en la medición de la frecuencia de batido. Esto se ha podido encontrar realizando un replanteo de la trayectorias de los haces y la consecuencia que esto trae a la expresiones teóricas desarrolladas.
«En la deducción de R_1 y R_2 (distancias del haz al eje de rotación L_A y L_B de la figura 2-b) se supuso que eran simétricas al eje de rotación del espejo. A pesar de que pequeñas vibraciones no perturban el resultado, faltas de simetría y vibraciones en el eje de la herramienta rotante introducen variaciones en la frecuencia de batido» (Grupo 1 - 2013)	Aunque su conclusión no ha sido correcta debido a dejarse llevar por aquellas variables que no son centrales en el experimento y de hecho no afectan, observamos que se ha visto obligado a vincular teoría con práctica en el discurrir de este experimento.

Conclusiones

En este artículo se ha mostrado el tipo de actividad que es posible desarrollar en el aula universitaria sin tener que recurrir a equipos costosos o material didáctico diseñado por empresas especializadas en educación en Física. Sin embargo, cabe destacar la posibilidad que una práctica de este tipo ofrece en cuanto a introducir enfoques pedagógicos de mayor participación. Permitiendo que el estudiante se involucre y salga de una postura pasiva ante la metodología y los contenidos teóricos. El diseño de este equipo didáctico fue el resultado de una investigación realizada por los autores (Bernal y Bilbao 2007) en el marco de un proyecto de investigación sobre aplicaciones y diagnósticas sobre el efecto Doppler de plasma y luego desarrollado en la cátedra de Física Experimental de la Licenciatura en Física de la UNMdP. El equipo fue manipulado por grupos de no más de cuatro estudiantes. Parte del proceso de evaluación de los contenidos consistió en observar el desempeño y participación grupal en la elaboración de los resultados de donde se obtuvieron las observaciones de la tabla 1. Estas observaciones muestran lo versátil que resulta este TPL para tratar el efecto Doppler óptico desde varios abordajes.

Por último diremos que otra cátedra de Física Experimental de nivel Universitario (Bombelli 2014) ha tomado este diseño y su equipamiento como posible actividad didáctica. Desde un punto de vista más instrumental diremos que esta práctica resulta atractiva para estudiantes y docentes por la excelente correlación lineal (ver figura 6) que presentan los datos respecto de los resultados que predice la teoría, al menos en lo que respecta a formación básica de licenciatura, profesorado o ingenierías.

Agradecimientos

Al Dr. Jorge López por las correcciones y apoyo incondicional. A la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP) y la Universidad Nacional de Buenos Aires (UBA) por el financiamiento del material y del proyecto que permitió escribir este artículo.

Referencias

- Acevedo Díaz J. A., Vázquez Alonso Á., Manassero-Mas M. A., Acevedo-Romero P. (2007) Consensos sobre la naturaleza de la ciencia: fundamentos de una investigación empírica. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 4 (1), 42-66.
- Baierlein R. (2006) Two myths about special relativity. *American Journal of Physics* 74 (3), 193-195.

- Belich T. J., Lahm R. P., Peterson R. W., Whipple C. D. (1997) Optical Doppler measurements. *American Journal of Physics* 65 (3), 186-190.
- Bensky T. J., Frey S. E. (2001) Computer sound card assisted measurements of the acoustic Doppler effect for accelerated and unaccelerated sound source. *American Journal of Physics* 69 (12), 1231-1236.
- Bernal L., Bilbao L. (2007) Optical Doppler shift measurement using a rotating mirror. *American Journal of Physics* 75 (3), 216-219.
- Bombelli L. (2014) *Doppler Effect and Other Causes of Frequency Shift*. Department of Physics and Astronomy at the University of Mississippi. Mississippi, EUA.
- Chalmers A. F. (2000) *¿Qué es esa cosa llamada ciencia?: una valoración de la naturaleza y el estatuto de la ciencia y sus métodos*. México. Siglo Veintiuno.
- Dewandre T., Albritton J. R., Williams E. A. (1981) Doppler shift of laser light reflected from expanding plasmas. *Physics of Fluids* 24 (3), 528-536.
- Einstein A. (1999) *Objetivo: Universo. Astronomía*. Buenos Aires. Ediciones Colihue SRL.
- Gil Pérez D. (1986) La metodología científica y la enseñanza de las ciencias: unas relaciones controvertidas. *Enseñanza de las Ciencias* 4 (2), 111-121.
- Gil Pérez D., Valdés Castro P. (1996) La orientación de las prácticas de laboratorio como investigación: un ejemplo ilustrativo. *Enseñanza de las Ciencias* 14 (2), 155-163.
- Gjurchinovski A. (2012) Reflection from a moving mirror—a simple derivation using the photon model of light. *European Journal of Physics* 34 (1), L1-L4.
- Hernandez M. A., Palau M. A., Andrés M. V. (1991) Experiencia de microondas para la observación del efecto Doppler. *Revista Española de Física* 5 (1), 38-41.
- Hodson D. (1994) Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio. *Enseñanza de las Ciencias* 12 (3), 299-313.
- Jackson J. D. (1999) *Classical electrodynamics*. New York. Wiley.
- Longari M. S. (1998) *La evolución del Universo*. Cambridge. Cambridge University Press.
- Petrucci D., Ure J., Salomone H. D. (2011) Cómo ven a los trabajos prácticos de laboratorio de física los estudiantes universitarios. *Revista de Enseñanza de la Física* 19 (1), 7-19.
- Romero G. G., Alanís E. E., Martínez C. C., Domínguez D. O. (2012) Una propuesta para registrar el desplazamiento Doppler de ondas de luz y oír sus batidos. *Anales de la Asociación Física Argentina* 22 (1), 5-8.
- Saba M. M. F., Rosa R. A. d. S. (2003) The Doppler effect of a sound source moving in a circle. *The Physics Teacher* 41 (2), 89-91.
- Saraiva-Neves M., Caballero C., Moreira M. A. (2006) Repasando o papel do trabalho experimental, na aprendizagem da Física, em sala de aula. Um estudo exploratório. *Investigações em Ensino de Ciências* 11 (3), 383-401.
- Séré M. G., Coelho S. M., Nunes A. D. (2003) O papel da experimentação no ensino da física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* 20 (1), 30-42.
- Serway R. A., Jewett J. W. (2009) *Física para ciencias e ingeniería*. Vol. 2. México. McGraw-Hill.
- Vázquez Alonso Á., Manassero Más M. A. (2015) La elección de estudios superiores científico-técnicos: análisis de algunos factores determinantes en seis países. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 12 (2), 264-277.